МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

«Структурна надійність об’єктів енергетики. Приклади вирішення задач»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
з курсу «Надійність та діагностика»

для студентів
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
блок дисциплін 141.13 «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії»
заочної форми навчання

Затверджено
на засіданні кафедри
інженерної електрофізики,
протокол №5 від 26.12.2019

Харків
НТУ «ХПІ»
2020

«Структурна надійність об’єктів енергетики. Приклади вирішення задач» Методичні вказівки для виконання індивідуальних завдань до курсу «Надійність та діагностика», для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», блок дисциплін 141.13 «Відновлювані джерела енергії та техніка і електрофізика високих напруг» заочної форми навчання/ Упоряд. Н.В. Веселова, О.Л. Резинкін, В.Є. Марценюк, О.Ю. Бондаренко, О.В. Левченко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 25 с. – Укр. мовою.

Укладачі: Н.В. Веселова,
О.Л. Резинкін
В.Є. Марценюк
О.Ю. Бондаренко
О.В. Левченко

Рецензент проф. С.Ю. Шевченко

Кафедра інженерної електрофізики

ВСТУП

Надійність та діагностика об’єктів енергетики ґрунтується на таких математичних дисциплінах, як: теорія ймовірностей, математична статистика, теорія графів, математичний аналіз та програмування.

Основним завданням структурної надійності є розроблення та дослідження методів забезпечення ефективності роботи різних об’єктів (виробів, пристроїв, систем) у процесі їх проектування, виготовлення та подальшої експлуатації. Теорія надійності установлює та вивчає кількісні характеристики надійності й досліджує зв’язок між показниками надійності та прогнозуванням часу безвідмовної роботи.

Структурна надійність об’єктів енергетики є однієї із найважливіших тем вивчення у рамках вивчення спеціальних дисциплін за спеціальністю Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Студенти за спеціалізацією «Відновлювані джерела енергії та техніка і електрофізика високих напруг» повинні чітко розуміти суть питань структурного резервування, вміти шляхом відповідного аналізу оцінювати фактичний рівень надійності і знати способи та засоби забезпечення безвідмовної роботи електроенергетичних систем, підсистем та об’єктів традиційної та відновлюваної енергетики.

Дисципліна «Надійність та діагностика» належить до циклу спеціалізованих дисциплін професійної підготовки студентів за освітньо–кваліфікаційним ступенем «бакалавр» та має на меті набуття знань і умінь з технології експлуатації електрообладнання, що дозволяє вирішувати завдання підвищення ефективності функціонування електроенергетичних об’єктів. Особливо важливим є вивчення даних питань у рамках підготовки інженерів за заочною формою навчання.

1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ КУРСУ

Надійність – властивість об’єкта виконувати задані функції, зберігаючи встановлені експлуатаційні показники в заданих межах при заданих режимах і умовах експлуатації протягом необхідного проміжку часу або необхідного напрацювання.

У визначенні надійності закладено чотири ознаки, а саме: здатність ви–конувати задані функції, успішна робота при експлуатації, умови експлуатації, і час роботи.

Надійність є комплексною властивістю, що у залежності від призначення електричного елемента і умов його експлуатації може включати в себе безвідмовність, довговічність, ремонтопридатність і збереження.

Безвідмовність – властивість об’єкта безупинно зберігати стан працездатності протягом певного часу або певного напрацювання.

Довговічність – властивість об’єкта зберігати працездатність до руйнування або до настання граничного стану. Ознаки граничного стану встаовлюються нормативно–технічними документами на об’єкт.

Граничним називається такий стан, при якому подальша експлуатація об’єкта неможлива через непереборність порушень, вимог безпеки або ефективності експлуатації, а також догляду параметрів за встановлені межі. Довговічність кількісно оцінюють ресурсом або терміном служби.

Ресурс – напрацювання об’єкта від початку експлуатації або його відновлення після ремонту до настання граничного стану. γ – відсоток ресурсу – напрацювання рівний або більший заданої γ % виробами із загальної партії.

Термін служби – календарна тривалість експлуатації до настання граничного стану. Необхідна довговічність електрообладнання визначається на основі досвіду тривалої експлуатації і відбивається в нормах і стандартах на окремі об’єкти.

Ресурс може вимірюватися часом або циклами. Для виробів, що працюють безперервно з рівномірним зносом, поняття «термін служби» і «ресурс» збігаються, якщо вироби виводяться з експлуатації не раніше, ніж настане граничний стан.

Поряд з поняттям граничного стану використовують поняття відмови.

Відмова – являє собою подію, що полягає в порушенні працездатності об’єкта (або його частини). Для електрообладнання критеріями відмови є невиконання виробом своїх основних функцій, якими, в залежності від його виду і типу є: 1) виконання головного цільового призначення (для трансформаторів – живлення електроприймачів струмом; для електродвигуна – привід робочої машини; для пускача – дистанційне керування електродвигуном і т.д.); 2) забезпечення електричних захистів: механічних, електричних і електромеханічних блокувань; перевірок спрацьовування захистів і повернення захистів в початковий стан; вибухозахищеності; заземлення корпусів; 3) можливість технічного обслуговування і ремонту, які обумовлені в нормативно–технічній документації на поставку виробів або в інструкціях по експлуатації.

Стосовно до вимог працездатності електрообладнання класифікують на відновлюване і невідновлювальне.

До відновлюваних виробів, тобто таких, працездатність яких можна відновити після відмови на місці установки або в майстернях, відносяться: комплектні розподільчі пристрої, комплектні трансформаторні підстанції, автоматичні вимикачі, пускачі, стаціонарні випробувальні установки і т.д.

До невідновлюваних виробів відносяться електричні лампи, акумулятори, резистори, конденсатори, діоди високовольтні і т.п. елементи, працездатність яких не може бути відновлена взагалі або це можливо тільки на спеціалізованому підприємстві централізованого ремонту.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Показники надійності підрозділяються на одиничні і комплексні. Поодинокі показники кількісно характеризують одну з чотирьох властивостей вироби: безвідмовність, ремонтопридатність, довговічність або збереженість.

Комплексні показники характеризують здатність виробу виконувати свої функції в процесі експлуатації з урахуванням того, що періодично буде здійснюватися технічне обслуговування і при необхідності ремонт виробу. Комплексні показники дають оцінки виду: наскільки ймовірним є те, що виріб буде працездатним в довільний момент часу; яка буде ефективність використання вироби в заданий період експлуатації з урахуванням того, що в ньому можуть виникати і усуватися відмови. Іншими словами, комплексні показники залежать одночасно від безвідмовності і ремонтопридатності виробу.

Показники безвідмовності. Найчастіше використовуються наступні одиничні показники безвідмовності: ймовірність безвідмовної роботи $P\ (t)$, інтенсивність відмов $\lambda\ (t)$, середнє напрацювання до першої відмови T_1, середнє напрацювання на відмову T. Останній показник застосовується для відновлюваних виробів, інші – для невідновлювальних. В окремому випадку, якщо оцінюється надійність відновлюваного вироби до першої відмови, показники $P\ (t)$, $\lambda\ (t)$, T_1 також можуть застосовуватися.

Імовірність безвідмовної роботи – імовірність того, що в межах заданого напрацювання t відмова виробу не виникне. Цей параметр пов’язаний з ймовірністю відмови співвідношенням:

$$P\ (t) = 1 - Q\ (t), \tag{2.1}$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу t;

$Q(t)$ – ймовірність появи відмови вироби протягом часу t.

Імовірність відмови $Q(t)$ відноситься до допоміжних показниками безвідмовності.

Функція $P(t)$ є монотонно спадною, а функція $Q(t)$ – монотонно зростаючою, причому $0 \leq P(t) \leq 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$.

Типовий графік функції $P(t)$ наведено на рисунку 2.1. Значення $P(t)$ визначає частку працездатних виробів в момент часу t_i.

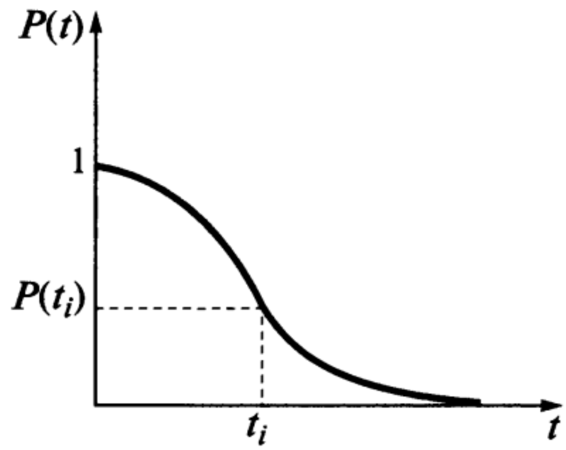


Рисунок 2.1 – Зміна ймовірності безвідмовної роботи вироби в часі

Для експериментального визначення показників надійності випробуванням піддають досить велику партію однотипних виробів і фіксують часи виникнення відмов. Програма випробувань може варіюватися в залежності від поставленої мети.

Для $P(t)$ використовується наступна статистична оцінка:

$$P(t) = \frac{N(t)}{No} = 1 - \frac{n(t)}{No}, \qquad (2.2)$$

де N_0 – число виробів, поставлених на випробування;

$N(t)$ – число виробів, що залишилися справними в момент часу t (відмовили в процесі випробувань вироби не ремонтуються);

$n(t)$ – число виробів, які відмовили в інтервалі часу (0, t).

Інтенсивність відмов – це умовна щільність ймовірності відмови виробів в певний момент часу напрацювання за умови, що до цього моменту відмов не було:

$$\lambda(t) = \frac{dQ(t)}{dt}\frac{1}{(1 - Q(t))} = -\frac{1}{p(t)}\frac{dP(t)}{dt}, \tag{2.3}$$

Для надійних систем, у яких $P \to 1$, інтенсивність відмов приблизно дорівнює щільності розподілу напрацювання до відмови. Статистично інтенсивність відмов визначається як частка виробів, які відмовляють у одиницю (проміжок) часу після моменту часу t:

$$\lambda(t) = \frac{n(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \tag{2.4}$$

де $n(t)$ та $n(t + \Delta t)$ – число виробів, які відмовили відповідно до моментам часу t та $(t + \Delta t)$;

$N(t)$ – число справних виробів в момент часу t.

Якщо $t = 0$, то $N(t) = N_0$.

Середнє напрацювання до відмови T_1 – математичне очікування напрацювання до відмови невідновлюваного вироби. для знаходження статистичної оцінки T_1 випробування ведуться до відмови всіх виробів в партії, при цьому:

$$T_1 = \frac{1}{No}\sum_{i=0}^{No} \tau_i, \tag{2.5}$$

де τ_i – напрацювання до відмови і–го виробу;

N_0 – число виробів, поставлених на випробування.

Середнє напрацювання на відмову T – математичне очікування напрацювання на відмову відновлюваного виробу.

Визначення T проводиться наступним чином: партію виробів ставлять на напрацювання, а відмови, що виникають, усувають і знову включають вироби в роботу. Статистична оцінка середнього напрацювання на відмову:

$$T = t / r(t), \tag{2.6}$$

де t – сумарне напрацювання виробів;

$r(t)$ – сумарна кількість відмов протягом напрацювання t.

Показники ремонтопридатності. Ремонтопридатність – властивість виробу, що полягає в пристосованості до підтримці і відновленню працездатного стану шляхом технічного обслуговування і ремонту.

Кількісно відновлюваність системи оцінюється наступними показниками: ймовірністю відновлення $P_в(\tau)$, середнім часом відновлення $T_в$ і інтенсивністю відновлення $\mu\ (\tau)$, які математично відповідають розглянутим показниками надійності: ймовірності відмови $Q\ (t)$, середньому часу напрацювання на відмову T і інтенсивності відмов виробу $\lambda\ (t)$.

Під ймовірністю відновлення розуміється ймовірність того, що виріб буде відновлено після відмови протягом заданого часу за певних умов ремонту. По аналогії з ймовірністю відмови цей показник можна уявити як ймовірність того, що випадковий час відновлення вироби буде не більш заданого.

Статистична оцінка ймовірності відновлення:

$$P_в\ (t)=\frac{n_в(\tau)}{N_в}, \tag{2.7}$$

де $n_в\ (\tau)$ – число виробів, відновлених за час τ;

$N_в$ – число виробів, яке треба відновити.

Кількісно функція $Pв\ (t)$ зазвичай визначається через інші показники відновлюваності: середній час відновлення і інтенсивність відновлення.

Найбільш наочним показником відновлюваності є середній час відновлення, під яким розуміється математичне сподівання випадкової величини – часу відновлення працездатного стану виробу після відмови.

Час відновлення працездатного стану виробу при відмові включає в себе час пошуку несправного елемента, час його заміни або ремонту і час перевірки працездатності після ремонту.

Середній час відновлення визначається як властивостями виробу (пристосованістю до проведення ремонту), так і іншими факторами (кваліфікацією обслуговуючого персоналу, його технічною оснащеністю).

Статистична оцінка середнього часу відновлення $T_в$:

$$T_в = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\tau_i, \tag{2.8}$$

де τ_i – час, витрачений на відновлення вироби при і–му відмову;

m – загальне число відновлень.

За наявності кількох комплектів однотипної апаратури, слід підсумувати проміжки часу відновлення по всім екземплярам і розділити цю суму на загальне число відмов.

3. СТРУКТУРНА НАДІЙНІСТЬ І ТИПОВІ СХЕМИ З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ

Всі технічні об'єкти складаються з елементів. Елементи фізично можуть бути з'єднані між собою самим різним чином.

Для наочного зображення з'єднань елементів використовуються різного роду схеми: Структурні, функціональні, принципові і т.д. Кожна з них має своє призначення і дозволяє аналізувати, як функціонує той чи інший виріб. Для аналізу рівня надійності розрахунку її показників застосовуються особливі схеми, які отримали назву структурних схем надійності.

Структурна схема надійності – це наочне графічне представлення умов, при яких працює або не працює досліджуваний елемент, об'єкт, система, пристрій і тому подібне.

Для складання структурної схеми надійності аналізують процес функціонування об'єкта, вивчають функціональні зв'язки між елементами, види відмов і причини їх виникнення. Таке дослідження вимагає високої інженерної та математичної ерудиції. Ступінь дроблення об'єкта на елементи залежить від конкретного завдання розрахунків. Одне і те ж з'єднання на принциповій схемі може мати абсолютно іншу сполуку на структурній схемі надійності. Основними відмовами електричних об'єктів є відмови типу «обрив» і «коротке замикання».

Нехай об'єкт складається з двох діодів VD1і VD2, фізично з'єднаних паралельно. При відмові типу «коротке замикання» схема вийде з ладу, коли відмовить будь–який з двох діодів. Тому структурна схема надійності для цього випадку зображується у вигляді послідовного з'єднання елементів. В іншому випадку, при відмові типу «обрив» паралельний ланцюг діодів відмовить тільки в разі відмови двох діодів. Отже, структурна схема надійності буде являти собою паралельне з'єднання елементів, рисунок 3.1.

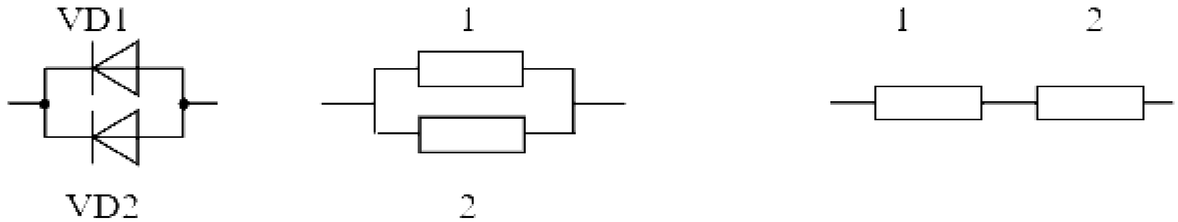


Рисунок 3.1 – Структурна схема надійності двох діодів VD1і VD2: паралельне поєднання – «обрив», послідовне – «коротке замикання»

Структурна надійність являє собою результуючу надійність системи при заданій структурі системи і відомих значеннях надійності всіх вхідних в неї комплектуючих (елементів).

Припустимо, що система складається з n різних елементів. Розглянемо надійність системи, що має різні сполуки елементів при наступних припущеннях:

–елементи незалежні, тобто ресурс окремих елементів не залежить один від одного, або відмова одного елемента не змінює надійності інших елементів;

–стан елементів системи (справний – несправний) однозначно визначають стан всієї системи;

–після відмов елементи не відновлюються.

3.1 Послідовне з’єднання елементів

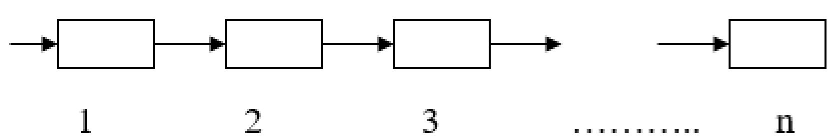


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення послідовного з’єднання елементів

При послідовному з’єднанні відмова будь–якого елемента викликає відмову системи. У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи системи визначається як добуток значень ймовірності безвідмовної роботи окремих елементів, тобто:

$$P_{\Sigma} = p_1 . p_2 . p_3 \cdots p_n = \prod_{i=1}^{n} p_i . \qquad (3.1)$$

Якщо ймовірність безвідмовної роботи елементів підпорядковується експоненціальним розподілом:

$$P_i = e^{-\lambda_i t}, \qquad (3.2)$$

де λ_i – інтенсивність відмов і–го елемента,

t – час роботи, то надійність системи (ЧБР – час безвідмовної роботи) дорівнює:

$$P_\Sigma = \prod_{i=1}^{n} e^{-\lambda_i t} = e^{-\lambda_\Sigma t}\ , \qquad (3.3)$$

$$де\ e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \cdots e^{-\lambda_n t} = e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\cdots\lambda_n)t} = e^{-\lambda_\Sigma t},$$

$$\lambda_\Sigma = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i\ . \qquad (3.4)$$

Відповідне значення середнього часу безвідмовної роботи визначає середній час до відмови або:

$$T = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{T_i}\right)^{-1}\ . \qquad (3.5)$$

Якщо надійності однакові, то $P_Z = p^n = e^{-nxt} = e^{-\lambda_\Sigma t}$.

Імовірність відмови визначається $Q_i = 1 - P_i = 1 - \prod_{i=1}^{n} p_i$.

3.2 Паралельне з’єднання елементів

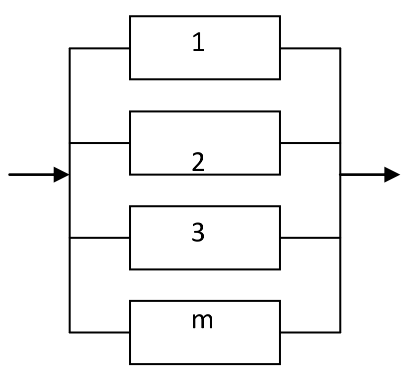


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення параллельного з’єднання елементів

Елементи з'єднані паралельно, якщо відмова системи настає тільки тоді, коли відмовляють всі елементи.

Якщо ймовірності безвідмовної роботи окремих елементів рівні p_1, p_2, p_3,……..p_i, то ймовірності відмови дорівнюватимуть $q_1 = 1–p_1$; $q_2 = 1–p_2$; ....$q_m=1–p_m$, а результуюча ненадійність схеми, тобто ймовірність відмови всієї системи буде дорівнювати:

$$q_\Sigma = q_1 \cdot q_2 \cdot ....q_m = \prod_{j=1}^{j=m} q_j = \prod_{j=1}^{j=m} \left(1 - p_j\right) \tag{3.6}$$

Надійність роботи даної схеми, що складається з паралельних з'єднаних блоків:

$$p_\Sigma = 1 - q_\Sigma = 1 - \prod_{j=1}^{j=m} \left(1 - p_j\right) \tag{3.7}$$

Для випадку, коли блоки мають однакову ненадійність q1 = q2 =....qm = q, маємо:

$$q_\Sigma = q_n^m = \left(1 - p\right)^m , \tag{3.8}$$

$$p_\Sigma = 1 - \left(1 - p\right)^m , \tag{3.9}$$

Якщо p підпорядковується експоненціальним розподілом, тобто: $p = e^{-\lambda t}$,

то $p_\Sigma = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^m$.

Середній час (математичне очікування) визначимо як:

$$T_{cp} = \int_0^\infty p(t)dt = \int_0^\infty \left[1 - (1 - e^{-\lambda t})^m dt\right] = \left\{ y = 1 - e^{-\lambda t};\, dy = -\lambda e^{-\lambda t} dt;\, dt = -\frac{dy}{\lambda e^{-\lambda t}} = \frac{dy}{\lambda(1 - 1 + e^{-\lambda t}} = \frac{dy}{\lambda(1-y)} \right\} =$$

$$\int_0^\infty (1 - y^m) \frac{dy}{\lambda(1-y)} = \frac{1}{\lambda}\left\{ \int_0^1 y^{m-1} dy + \int_0^1 y^{m-2} dy + \ldots \int_0^1 dy \right\} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} + \ldots + \frac{1}{m\lambda} . \tag{3.10}$$

При *n=2*, $T = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\lambda} = \frac{3}{2} T_0$, де T_0 середній час роботи одного елемента.

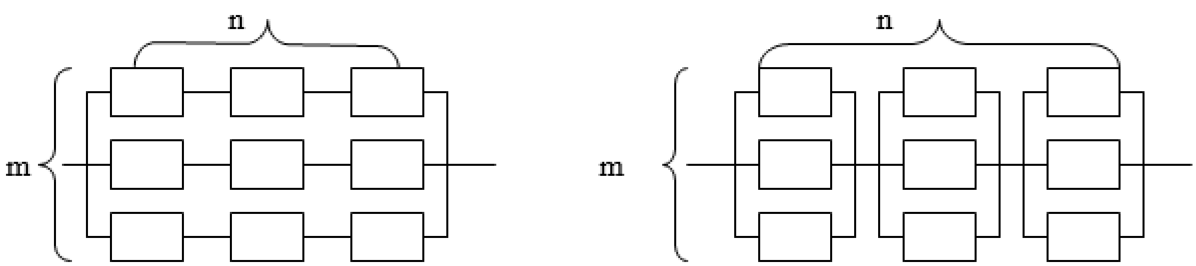
Паралельне з’єднання виникає зазвичай тоді, коли всі елементи виконують одну і ту ж функцію. Для її виконання досить одного елемента, інші грають роль резервних. Такий тип резервування є навантаженим резервом. При цьому елементи, як правило, однакові і мають рівний ЧБР. Для них справедливий вираз (3.9). Є ще резервування заміщенням і ковзне резервування. Слід зауважити, що якщо надійності елементів підкоряються експоненціальним законом, то результуюча надійність вже не буде підкорятися цим законом або:

$$p_1 = e^{-\lambda_1 t}\,;\ p_2 = e^{-\lambda_2 t}\,;......p_m = e^{-\lambda_m t},$$

$$p_\Sigma = 1-\left(1-e^{\lambda_1 t}\right)\left(1-e^{\lambda_2 t}\right)....\left(1-e^{\lambda_m t}\right). \qquad (3.11)$$

3.3 Паралельно–послідовне з’єднання елементів

Можливі два поширених випадка з’єднання елементів.



а) б)

Рисунок 3.4 – Схеми змішаного включення елементів:

а) є «m» паралельних ланцюжків по «n» послідовно включених елементів;
б) послідовно з’єднано «n» груп з «m» паралельно з’єднаних однакових елементів.

У схемі а) є m паралельних ланцюжків по n послідовно включених елементів. Для спрощення викладок вважаємо, що системи (а, б) виконані з однакових елементів ЧБР. ЧБР кожного ланцюжка (послідовне з’єднання елементів) дорівнюватиме:

$$p_\Sigma^1 = p^n. \qquad (3.12)$$

Імовірність відмов $$q^1 = 1 - p_\Sigma^1 = 1 - p^n. \qquad (3.13)$$

Для паралельно включених m ланцюгів при ймовірності відмов кожного, рівній q_1, імовірність відмови дорівнює:

$$q_\Sigma = \left(q^1\right)^m = \left(1 - p^n\right)^m. \qquad (3.14)$$

Надійність всієї системи:

$$p_\Sigma = 1 - q_\Sigma = 1 - \left(q^1\right)^m = 1 - \left(1 - p^n\right)^m. \qquad (3.15)$$

Вважаючи $m \to \infty$, одержимо $p_\Sigma \to 1$, тобто паралельне з'єднання ланцюжків з однакових блоків збільшує надійність схеми.

Якщо $n \to \infty$, то $p_\Sigma \to 0$;

При $n \to \infty$ і $m \to \infty$, $p_\Sigma \to 0$.

У схемі б) рисунку 3.3 послідовно з'єднане «n» груп з «m» паралельно з'єднаних однакових елементів. Надійність роботи групи (паралельне з'єднання):

$$p_\Sigma^1 = 1 - \left(1 - p\right)^m, \qquad (3.16)$$

Надійність роботи всієї системи:

$$p_\Sigma = \left(p_\Sigma^1\right)^n = \left[1 - \left(1 - p\right)^m\right]^n. \qquad (3.17)$$

При $m \to \infty$ значення $p_\Sigma \to 1$, якщо $n \to \infty$, то $p_\Sigma \to 0$. Нарешті при $m \to \infty$ і $n \to \infty$, $p_\Sigma \to 1$.

У загальному випадку, коли послідовне з'єднання n груп, що мають різне число m паралельно з'єднаних елементів при різної надійності, ненадійність будь i–ої групи з m_i елементів визначається як:

$$q_i = \prod_{j=1}^{j=m_i} q_j = \prod_{j=1}^{j=m_i} \left(1 - p_j\right), \qquad (3.18)$$

а значення надійності (імовірності безвідмовної роботи)

$$p_i = 1 - q_i = 1 - \prod_{j=1}^{j=m_i} \left(1 - p_j\right). \qquad (3.19)$$

Результуюча надійність схеми:

$$p_\Sigma = \prod_{i=1}^{i=n} p_i = \prod_{i=1}^{i=n} \left[1 - \prod_{j=1}^{j=m_i} \left(1 - p_j\right)\right]. \qquad (3.20)$$

4. ПРИКЛАДИ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ

Приклад 4.1

Розрахунок структурної надійності невідновлювальних об'єктів.

Система являє собою послідовне з'єднання елементів структурної схеми надійності. Відомі інтенсивності відмов кожного з елементів. Визначити інтенсивність відмов системи, ймовірність безвідмовної роботи і ймовірність відмов системи на момент часу t = 100000 годин.

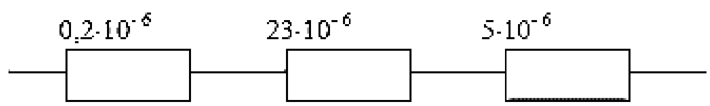


Рисунок 4.1 – Схема структурної системи послідовного підключення об'єктів

Рішення.

<u>Перший метод:</u>

Для визначення інтенсивності відмов використовуємо формулу 3.4:

$$\lambda_С = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 0{,}2 \cdot 10^{-6} + 23 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} = 28{,}2 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Імовірність безвідмовної роботи при експоненційному закону розподілу показників надійності

$$P_С(100000) = e^{-28{,}2\cdot10^{-6}\cdot10^5} = e^{-2{,}82} = 0{,}0596$$

Імовірність відмови

$$Q_C(100000) = 1 - P(100000) = 1 - 0{,}0596 = 0{,}9404$$

<u>Другий метод:</u>

Визначаємо ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента

$$P_1(100000) = e^{-0{,}2\cdot 10^{-6}\cdot 10^5} = e^{-0{,}02} = 0{,}9802$$
$$P_2(100000) = e^{-23\cdot 10^{-6}\cdot 10^5} = e^{-2{,}3} = 0{,}1003$$
$$P_3(100000) = e^{-5\cdot 10^{-6}\cdot 10^5} = e^{-0{,}5} = 0{,}6065$$

Використовуючи формулу теорії ймовірностей безвідмовної роботи для послідовного з'єднання елементів визначаємо ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P_C(100000) = P_1(100000)\cdot P_2(100000)\cdot P_3(100000) = 0{,}9802\cdot 0{,}1003\cdot 0{,}6065 = 0{,}0596$$

Висновки, які робимо із рішення задачі:

1. Чим більше елементів, що складають систему з послідовним з'єднанням елементів, тим вище інтенсивність відмов і, отже, нижче надійність системи.

2. Підсумкова ймовірність безвідмовної роботи системи нижче ймовірності безвідмовної роботи самого надійного елемента.

Приклад 4.2

Лампочки підключені через амперметр, надійність кожної відповідно: $P_1 = 0{,}9$; $P_2 = 0{,}85$; $P_3 = 0{,}95$. Знайти ймовірність того, що струм в електричному ланцюзі буде відсутній.

Рішення.

$$Q = 1 - P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = 1 - 0{,}9\cdot 0{,}85\cdot 0{,}95 = 0{,}273.$$

Приклад 4.3

Система являє собою паралельне з'єднання елементів в структурній схемі надійності. Відомі інтенсивності відмов кожного з елементів. Визначити ймовірність безвідмовної роботи і ймовірність відмов системи на момент часу t = 100000 годин.

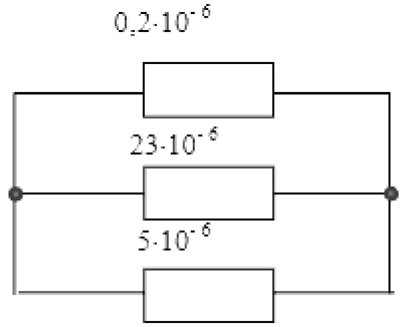


Рисунок 4.2 – Схема структурної системи параллельного підключення об̓єктів

Рішення.

Визначаємо ймовірності безвідмовної роботи кожного елемента

$$P_1(100000) = e^{-0,2\cdot10^{-6}\cdot10^5} = e^{-0,02} = 0,9802$$
$$P_2(100000) = e^{-23\cdot10^{-6}\cdot10^5} = e^{-2,3} = 0,1003$$
$$P_3(100000) = e^{-5\cdot10^{-6}\cdot10^5} = e^{-0,5} = 0,6065$$

Визначаємо ймовірності відмов елементів

$$Q_1(100000) = 1 - 0,9802 = 0,019$$
$$Q_2(100000) = 1 - 0,1003 = 0,899$$
$$Q_3(100000) = 1 - 0,6065 = 0,393$$

Визначаємо ймовірність відмови системи з паралельним з’єднанням елементів в структурній схемі надійності:

$$Q_C(100000) = Q_1(100000)\cdot Q_2(100000)\cdot Q_3(100000) = 0,0198\cdot0,8997\cdot0,3935 = 0,007$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P_\text{C}(100000) = 1 - Q_C(100000) = 1 - 0,007 = 0,993$$

Інтенсивність відмов системи з паралельно з’єднаних елементів

$$lnP_C(100000) = ln\, e^{-\lambda_c \cdot 10^5}$$

$$ln0{,}993 = -\lambda_c \cdot 10^5$$

$$\lambda_c = \frac{ln0{,}993}{-10^5} = \frac{0{,}007025}{10^5} = 0{,}07025 \cdot 10^{-6}$$

Висновки, які робимо із рішення задачі:

1. Чим більше елементів, що складають систему з паралельним з'єднанням елементів, тим нижче інтенсивність відмов і, отже, вище надійність системи.

2. Підсумкова ймовірність безвідмовної роботи системи вище ймовірності безвідмовної роботи самого надійного елемента.

Приклад 4.4

Високовольтна підстанція отримує живлення від трьох незалежних джерел живлення:

- вітроелектростанції,
- сонячної електростанції
- теплової електростанції.

З надійністю, відповідно: P_1=0,85; P_2=0,8; P_3=0,9.

Визначити ймовірність безперебійної роботи високовольтної підстанції.

Рішення.

$$P = 1 – P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = 1 – (1 – P_1) \cdot (1 – P_2) \cdot (1 – P_3) =$$
$$= 1 – (1 – 0{,}85) \cdot (1 – 0{,}8) \cdot (1 – 0{,}9) = 0{,}997.$$

Приклад 4.5

У електричній схемі є m=2 паралельних ланцюгів по n=2 послідовно включених елементів. При цьому кожний з елементів має імовірність безвідмовної роботи P_i = 0,9. Знайти надійність роботи такої схеми.

Рішення:

$$P_\Sigma = 1-(1-p^n)^m = 1-(1-0{,}9^2)^2 = 1-(1-0{,}81)^2 = 1-0{,}19^2 = 1-0{,}0361 = 0{,}9639.$$

Приклад 4.6

У електричній схемі є m=3 паралельних ланцюгів по n=3 послідовно включених елементів. При цьому кожний з елементів має імовірність безвідмовної роботи P_i = 0,9. Знайти ймовірність безвідмовної роботи схеми.

Рішення:

$$P_{\Sigma} = 1-(1-0{,}729)^3 = 1-0{,}271^3 = 1-0{,}0199 = 0{,}98009.$$

Приклад 4.7

У електричній схемі послідовно з'єднано n=2 груп з m=2 паралельно з'єднаних однакових елементів. При цьому кожний з елементів має імовірність безвідмовної роботи P_i = 0,9. Знайти надійність роботи такої схеми.

Рішення:

$$P_{\Sigma} = \{1-(1-p^m)\}^n = \{1-(1-0{,}9^2)\}^2 = (1-0{,}01)^2 = 0{,}99^2 = 0{,}9801.$$

Приклад 4.8

У електричній схемі послідовно з'єднано n=3 груп з m=3 паралельно з'єднаних однакових елементів. При цьому кожний з елементів має імовірність безвідмовної роботи P_i = 0,9. Знайти ймовірність безвідмовної роботи схеми.

Рішення:

$$P_{\Sigma} = \{1-(1-0{,}9)^3\}^3 = (1-0{,}001)^3 = 0{,}999^3 = 0{,}99700.$$

Приклад 4.9

Задана структурна схема надійності змішаного з'єднання елементів системи (паралельно–послідовне). Відомі імовірності безвідмовної роботи елементів, що входять в систему. Визначити імовірність безвідмовної роботи системи рис. 4.1:

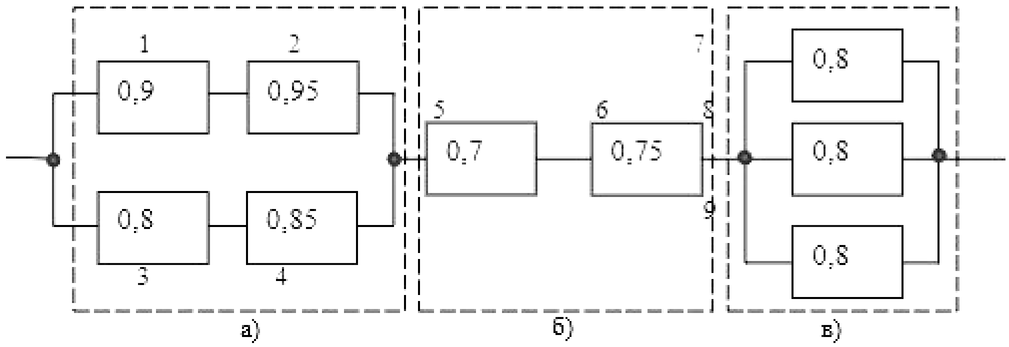


Рисунок 4.1 – Структурна схема надійності змішаного з’єднання елементів із зазначеними імовірностями безвідмовної роботи

Рішення:

Необхідно звести складну структуру змішаного з’єднання до схеми, яка буде містити тільки послідовне з’єднання елементів.

Для цього:

1. Визначаємо ймовірність безвідмовної роботи послідовного з’єднання елементів 1 і 2:

$$P_{12} = P_1 P_2 = 0{,}9 \cdot 0{,}95 = 0{,}855$$

2. Визначаємо ймовірність безвідмовної роботи послідовного з’єднання елементів 3 і 4:

$$P_{34} = P_3 P_4 = 0{,}8 \cdot 0{,}85 = 0{,}68$$

3. Ділянка схеми а) являє собою паралельне з’єднання елементів 1, 2 і 3,4. Звідси ймовірність безвідмовної роботи ділянки схеми:

$$P_a = 1 - (1 - P_{12})(1 - P_{34}) = 1 - (1 - 0{,}855)(1 - 0{,}68) = 1 - 0{,}145 \cdot 0{,}32 = 1 - 0{,}0464 = 0{,}953$$

4. Структура ділянки схеми б) являє собою послідовне з’єднання елементів 5 і 6, тоді:

$$P_б = P_5 P_6 = 0{,}7 \cdot 0{,}75 = 0{,}525$$

Структура ділянки схеми в) являє собою паралельне з’єднання елементів 7, 8 і 9. Зважаючи на те, що елементи мають однакову надійність, тоді:

$$P_в = 1 - (1 - P_7)(1 - P_8)(1 - P_9) = 1 - (1 - 0{,}8)^3 = 1 - 0{,}2^3 = 1 - 0{,}008 = 0{,}992$$

Визначаємо імовірність безвідмовної роботи системи, тобто з'єднання послідовних елементів:

$$P_{\Sigma} = P_а \cdot P_б \cdot P_в = 0{,}9536 \cdot 0{,}525 \cdot 0{,}992 = 0{,}497.$$

5. МЕТОД РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЗІ СТРУКТУРНОЮ НАДМІРНІСТЮ БЕЗ ВІДНОВЛЕННЯ

Складні системи поділяються на системи з послідовно–паралельними зв'язками; системи, які мають елементи типу " трикутник" і "зірка"; системи з перехресними зв'язками.

Розглянемо основний метод визначення показників надійності для вищезгаданих структур складних систем за умови, що відновлення відмовивших елементів неможливе. Метод згортання. Дуже часто зустрічаються послідовно–паралельні структури складних систем. Для таких структур ефективним методом є метод згортання. Цей метод заснований на послідовному перетворенні структури системи та зведенні її до основного поєднання елементів. Розглянемо цей метод на прикладі схеми, яка зображена на рисунку 5.1

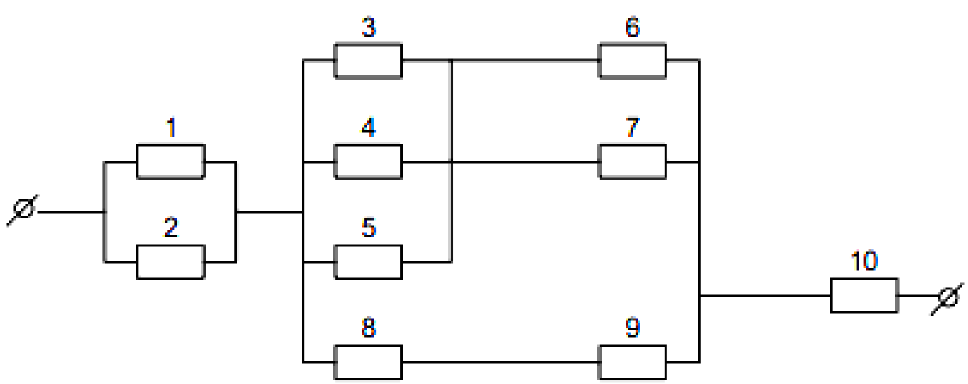


Рисунок 5.1 – Схема складної системи

Метод згортання складається з кількох етапів. На першому етапі розглядаються всі паралельні з'єднання, які замінюються еквівалентними елементами з відповідними показниками надійності. У схемі 5.1 такими паралельними елементами є: 1 і 2; 3, 4 і 5; 6 і 7. Після першого етапу перетворена схема має вигляд (рисунок 5.2):

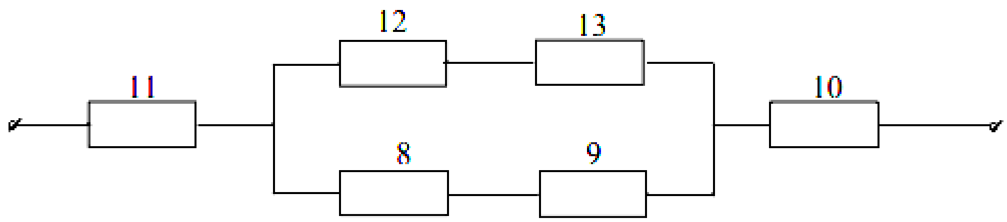


Рисунок 5.2 – Еквівалентна схема після першого етапу перетворення

Характеристики надійності елементів схеми дорівнюють:

$$p_{11} = 1 – (1 – p_1)(1 – p_2)$$

$$p_{12} = 1 – (1 – p_3)(1 – p_4)(1 – p_5)$$

$$p_{13} = 1 – (1 – p_6)(1 – p_7)$$

Розглянемо всі послідовні елементів, які замінюються еквівалентними. У прикладі це елементи: 8 і 9; 12 і 13. Схема набуває вигляду 5.3:

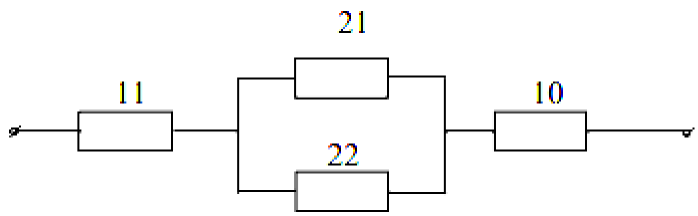


Рисунок 5.3 – Еквівалентна схема після другого етапу перетворення

Характеристики надійності елементів після другого етапу:

$$p_{21} = [1-(1-p_3)(1-p_4)(1-p_5)][1-(1-p_6)(1-p_7)];$$

$$p_{22} = p_8 p_9.$$

На третьому етапі знову розглядаються всі паралельні з’єднання, які замінюються еквівалентними. Це елементи 21 і 22. Схема набуде вигляду 5.4:

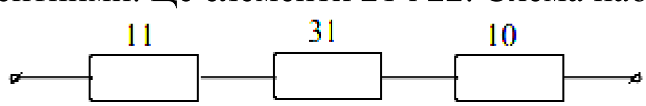


Рисунок 5.4 – Еквівалентна схема після третього етапу перетворення

Визначемо параметри надійності:

$$p_{31} = 1 - (1 - p_{21})(1 - p_{22}) =$$
$$= 1 - \{1 - [1 - (1 - p_3)(1 - p_4)(1 - p_5)[1 - (1 - p_6)(1 - p_7)]\}(1 - p_8 p_9).$$

В результаті усіх перетворень отримаємо послідовне з’єднання елементів. На четвертому етапі для послідовної структури системи визначаємо ймовірність її безвідмовної роботи:

$$P_{\Sigma} = p_{11} \cdot p_{31} \cdot p_{10}.$$

Метод згортання є ефективним методом визначення показників надійності послідовно–паралельних структур складних систем без відновлення. Кількість елементів мало впливає на складність проведення розрахунків. Недоліком методу можна визначити обмеженість паралельно–послідовними схемами. Проте, для більшості задач з надійності та діагностики, цей метод та методи визначення імовірності безвідмовної роботи при паралельній, послідовній та паралельно–послідовних схемах, є інформативними та дозволяють визначити значення надійності з великою вірогідністю.

ЗМІСТ

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надѐжности автоматических систем управления. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.

2. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надѐжности. – М.: Высшая школа, 1985. – 168 с.

3. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надѐжности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Сов. радио, 1975.–472 с.

4. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов. Москва, 2004. – 432 с.

5. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования технологии и надѐжности ЭВА. – М.: Радио и связь, 1983. – 312 с.

6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей. – М.: наука, 1983. – 416 с.

7. Григорьян С. Г. Техническая диагностика и надёжность систем управления: учебнометодическое пособие для практических занятий/Южно–Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И.Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2017. – 51 с.

Самостійне електронне видання